

学校编码: 10384  
学号: 25320101151711

分类号\_\_\_\_\_密级\_\_\_\_\_  
UDC\_\_\_\_\_

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

厦门地区在役公路桥梁抗震性能评估

Seismic Performance Evaluation of Existing Highway  
Bridge in Xiamen

黄起益

指导教师姓名: 宋雨 副教授

专 业 名 称: 结 构 工 程

论文提交日期: 2013 年 5 月

论文答辩时间: 2013 年 6 月

学位授予日期: 2013 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2013 年 06 月

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为( )课题(组)的研究成果,获得( )课题(组)经费或实验室的资助,在( )实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（        ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，  
于        年        月        日解密，解密后适用上述授权。

（        ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年        月        日

厦门大学博硕士论文摘要库

## 摘 要

地震是地壳运动的一种自然表现。研究地震工程的目的就是预测地震给工程结构物带来的影响,从而通过合理设计降低结构的危险。而公路桥梁往往是生命线工程中不可忽视的重要组成部分,在抗震救灾中具有显著作用。厦门,作为中国东南沿海副省会城市,位于台湾海峡西岸,与我国强震密度和平均震级都最高的台湾省隔海相望,经常受到西太平洋强震或台湾地区强震余震的影响。目前,厦门地区在役公路桥梁(大桥、超大桥)超过 30 座,其中,90%以上的桥梁是在《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02-01-2008)和《城市桥梁抗震设计规范》(CJJ 166-2011)颁布以前建立的。对于这些在役的公路桥梁,其整体的抗震性能如何,一直是人们关注的焦点。

本文分两个等级评估厦门地区在役公路桥梁的抗震性能。首先通过一级评估大致了解厦门地区所有在役公路桥梁的抗震性能状态,再从一级评估结果中根据不同桥型选取几座抗震性能最差的典型桥梁作为二级评估对象进行定量分析。最后,综合一级评估和二级评估结果,确定厦门地区在役公路桥梁的抗震性能能够满足公路桥梁抗震规范要求。这些桥梁在震后能够正常发挥桥梁的抗震救灾作用。

一级评估,采用经验统计法。经验统计法是桥梁结构抗震性能评估的定性分析方法,它不需要通过复杂计算就可以确定桥梁在未来地震中可能的破坏等级,使用起来经济方便。本文选取具有代表性的久保庆三郎方法、日本土木工程学会方法、朱美珍方法和 I.G.Buckle 方法。一级评估结果表明,大部分桥梁震后发生轻微破坏,只有少数桥梁发生中等破坏,没有一座桥梁发生严重破坏。厦门地区在役公路桥梁的抗震性能普遍较好。

二级评估,采用 pushover 分析方法。Pushover 方法是基于性能评估现有结构和设计新结构的一种常用的定量分析方法。本文二级评估对象是从一级评估结果中选取的抗震性能最差的三座桥梁,即碧溪大桥、疏港路高架桥和建港路跨线桥。二级评估结果表明,三座桥梁的抗震性能都能满足新旧规范的抗震要求,都处于轻微破坏极限状态。

**关键词:** 抗震性能评估 经验统计法 Pushover 分析方法

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## Abstract

An earthquake is a shaking of the ground caused by movement of the Earth's crust. The objective of earthquake engineering is to foresee the impact of earthquakes on buildings and other structures and to design such structures to minimize the risk of damage. Highway bridges play the most important role during earthquake relief work, which should not be ignored as well. Xiamen is a deputy provincial capital city located in the west side of the Taiwan Strait. As a consequence, some strong earthquakes from the Western Pacific or its aftershock has a great effect on Xiamen. Up to now, the amount of in-service highway bridges reached more than 30, including large bridge and super-large bridge, in which 90% of them were designed and built before the issue of *Guidelines for Seismic Design of Highway Bridges (JTG/T B02-01-2008)* and *Code for Seismic Design of Urban Bridges (CJJ 166-2011)*. Therefore, the seismic behavior of these bridges has been the focus of bridge engineers and some related authorities.

In this paper, the seismic performance of existed highway bridges in Xiamen is evaluated by two stages. In the first stage, i.e. A-level evaluation, some empirical statistical analysis methods are applied to get a rough understanding on seismic performance of all bridges. Then, several bridges with different types are selected as the typical cases for further analysis, which have the worst results based on the evaluation in the first stage. In the following stage, i.e. B-level evaluation, the pushover analysis method is adopted to carry out the quantitative analysis for the typical cases. Afterwards, the seismic condition of all the bridges is obtained through the two stage evaluation. It is obvious from the results that all the existing highway bridges in Xiamen can meet the requirements of the two specifications.

A-level evaluation is a qualitative analysis based on empirically statistical analysis methods, by which the damage classification can be determined economically and conveniently without complex calculations. Four representative methods, i.e., Keizaburo KUBO method, the Japan Society of Civil Engineering method, ZHU Meizhen method and I.G.Buckle method, are applied in this paper to evaluate seismic performance of all existing highway bridges during A-level evaluation. It is shown from the results that most of the bridges are belong to 'slightly damage' after strong

earthquake, only a small number of bridges are ‘medium damage’, and no bridge is ‘serious damage’. It is concluded that the seismic performance of the evaluated highway bridges in Xiamen is good.

B-level evaluation is a quantitative analysis based on pushover analysis method, which is commonly used to evaluate seismic performance of existed or new designed bridge structures. Three bridges are selected according to the results of A-level evaluation, i.e., Bixi Bridge, Shugang Road Viaduct and Jiangang Road Viaduct, covering two specific types such as simply supported bridge with double column pier and continuous beam bridge with single column pier or double column pier. Based on the results of B-level evaluation, the seismic performance of three participated bridges are all in slightly damaged state, which can meet the requirements of the two specifications.

**Keywords:** seismic performance evaluation; empirical statistical analysis methods; pushover analysis method



## 目 录

中文摘要.....	I
英文摘要.....	III
第一章 绪论 .....	1
1.1 研究背景及意义 .....	1
1.2 新旧公路桥梁抗震规范比较 .....	2
1.3 公路桥梁抗震性能评估研究现状 .....	5
1.4 本文研究内容 .....	8
第二章 公路桥梁抗震性能评估方法 .....	11
2.1 一级评估方法——经验统计法 .....	11
2.1.1 久保庆三郎方法.....	11
2.1.2 日本土木工程学会方法.....	12
2.1.3 朱美珍方法.....	12
2.1.4 I. G. Buckle 方法 .....	13
2.1.5 一级评估方法小结.....	13
2.2 二级评估方法——Pushover 方法.....	17
2.2.1 Pushover 分析原理 .....	17
2.2.2 Pushover 分析步骤 .....	17
2.2.3 目标位移与能力谱法.....	18
2.2.4 水平荷载加载模式.....	19
2.2.5 结构破坏极限状态.....	20
2.3 本章小结 .....	21
第三章 厦门地区在役公路桥梁抗震性能评估 .....	23
3.1 一级评估 .....	23
3.1.1 一级评估示例与结果.....	23
3.1.2 简支梁桥一级评估结果.....	28
3.1.3 连续梁桥一级评估结果.....	29
3.1.4 拱桥一级评估结果.....	30
3.1.5 一级评估结果小结.....	30

3.2 二级评估 .....	31
3.2.1 碧溪大桥二级评估及结果.....	31
3.2.2 疏港路高架桥二级评估及结果.....	41
3.2.3 建港路跨线桥二级评估及结果.....	48
3.2.4 二级评估结果小结.....	56
3.3 本章小结 .....	57
第四章 结论与展望 .....	59
4.1 结论 .....	59
4.2 展望 .....	59
参 考 文 献 .....	61
致 谢.....	65
攻读硕士学位期间获得的研究成果 .....	66

## Table of Contents

<b>Abstract in Chinese.....</b>	<b>I</b>
<b>Abstract in English .....</b>	<b>III</b>
<b>Chapter 1 Introduction .....</b>	<b>1</b>
1.1 Research Background and Significance.....	1
1.2 Comparison of Two Seismic Codes.....	2
1.3 Present Situation of Seismic Performance Evaluation.....	5
1.4 The Main Research Content.....	8
<b>Chapter 2 Seismic Performance Evaluation Methods .....</b>	<b>11</b>
2.1 A-Level Seismic Performance Evaluation Methods.....	11
2.1.1 Method of Keizaburo KUBO.....	11
2.1.2 Method of the Japan Society of Civil Engineering.....	12
2.1.3 Method of ZHU Meizhen.....	12
2.1.4 Method of I. G. Buckle.....	13
2.1.5 Summary of Four Methods.....	13
2.2 B-Level Seismic Performance Evaluation Methods.....	17
2.2.1 Principle of Pushover Analysis Method.....	17
2.2.2 Procedures of Pushover Analysis Method.....	17
2.2.3 Target Displacement and Capacity Spectrum Method.....	18
2.2.4 Loading Mode of Horizontal Load.....	19
2.2.5 Structural Damage Limit State.....	20
2.3 Summary.....	21
<b>Chapter 3 Seismic Performance Evaluation of Existing Highway Bridges in Xiamen.....</b>	<b>23</b>
3.1 A-Level Evaluation.....	23
3.1.1 A-Level Evaluation Examples and Results.....	23
3.1.2 A-Level Evaluation Results of Simple Supported Girder Bridges.....	28
3.1.3 A-Level Evaluation Results of Continuous Girder Bridges .....	29

3.1.4 A-Level Evaluation Results of Arch Bridges.....	30
3.1.5 Summary of A-Level Evaluation.....	30
<b>3.2 B-Level Evaluation.....</b>	<b>31</b>
3.2.1 B-Level Evaluation of Bixi Bridge.....	31
3.2.2 B-Level Evaluation of Shugang Road Viaduct.....	41
3.2.3 B-Level Evaluation of Jiangang Road Viaduct.....	48
3.2.4 Summary of B-Level Evaluation.....	56
<b>3.3 Summary.....</b>	<b>57</b>
<b>Chapter 4 Conclusions and Recommendations .....</b>	<b>59</b>
4.1 Conclusions.....	59
4.2 Recommendations.....	59
<b>References .....</b>	<b>61</b>
<b>Acknowledgement .....</b>	<b>65</b>
<b>List of Publications .....</b>	<b>66</b>

# 第一章 绪论

## 1.1 研究背景及意义

众所周知，地震是地壳运动的一种自然表现。人类无法阻止，只能预防。

中国，一个地震多发的国家，地震发生频率高、强度大、分布范围广、灾害严重。根据 1990 年国家地震局公布的中国地震烈度基本区划图，我国地震烈度 7 度及以上地区面积达 312 万  $\text{km}^2$ ，占国土总面积近 1/3，几乎所有的省、市、自治区都发生过六级以上的破坏性地震<sup>[1]</sup>。

厦门，一座位于海峡西岸的滨海城市，与我国强震密度和平均震级都最高的台湾省隔海相望，经常受到西太平洋强震或台湾地区强震余震的影响<sup>[2]</sup>。

从已发生的国内外强震看，强震不仅会造成人员伤亡，还会造成极大的经济损失，甚至引发社会、政治、经济等问题。公路桥梁是生命线工程中不可忽视的重要组成部分。在抗震救灾中，公路交通运输网更是抢救人民生命财产和尽快恢复生产、重建家园、减轻次生灾害的重要环节。为了提高公路桥梁抗震性能，我国分别于 1989 年和 2008 年颁布两本抗震设计理念截然不同的公路桥梁抗震规范——《公路工程抗震设计规范》(JTJ 004-89)（以下简称旧规范）和《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02-01-2008)（以下简称新规范）。

新规范颁布实施到现在不到 5 年时间，国内大量在役公路桥梁仍旧是参照旧规范设计的，厦门地区亦是如此。根据厦门市公路局桥梁资料库查知，其所管养的厦门地区 32 座桥梁<sup>①</sup>大部分于 2008 年之前建立<sup>[3]</sup>。也就是说，目前厦门地区在役公路桥梁都是按旧规范设计的桥梁，这必然导致部分桥梁可能不满足新规范的抗震设计要求。这正是本文研究“厦门地区在役公路桥梁抗震性能评估”的缘由所在，而这 32 座桥梁也就理所当然地成为本文研究对象。

另外，本文通过评估厦门地区所有大桥的抗震性能，一方面可以让大家了解厦门地区在役公路桥梁的抗震性能状态，另一方面可以将评估结果供厦门市公路局参考，希望公路局在往后的桥梁巡查和管理养护中能够多加留意，甚至采取必要的加固措施。

<sup>①</sup>本文提到的厦门桥梁都是指厦门地区除跨海大桥以外由厦门市公路局管养的大桥，后文将不再说明。

## 1.2 新旧公路桥梁抗震规范比较

新旧规范颁布时间间隔将近 20 年，其设计理念、设计方法及具体的条文内容都有很大的不同。相对于旧规范，新规范通过吸收美国、日本等发达国家现行抗震设计规范的理念和方法，吸取近二十年桥梁震害的教训，主要做出如下修订内容：

(1) 扩大了适用范围，增加了非规则桥梁的抗震设计内容；对斜拉桥、悬索桥、单跨跨径超过 150m 的特大跨径梁桥和拱桥给出了抗震设计原则和有关规定；增加了减隔震桥梁的设计原则和有关规定；

(2) 修订了相应的设防标准和设防目标，采用了两水平设防、两阶段设计的抗震设计思想，由单一的强度抗震设计修改为强度和变形双重指标控制的抗震设计；

(3) 补充、细化了场地和地基部分的有关规定。补充修订了地震土压力计算公式；

(4) 修订了地震作用部分，修订了水平设计加速度反应谱，反应谱周期由 5s 增加到 10s，增加了场地系数、阻尼调整系数、竖向设计加速度反应谱等内容，增加了地震作用分量组合、设计地震动时程等有关规定，取消了综合影响系数；

(5) 增加了桥梁延性抗震设计和能力保护原则的有关规定，增加了延性构造细节设计的有关规定；

(6) 增加了抗震分析建模原则和抗震分析方法等有关规定；

(7) 修订了抗震措施的有关规定。

这其中新规范采用的“两水平设防、两阶段设计”延性抗震设计思想是桥梁抗震规范发展到现在最先进的设计理念。所谓的“两水平设防、两阶段设计”抗震设计思想是指<sup>[4]</sup>：第一阶段的抗震设计，采用弹性抗震设计；第二阶段的抗震设计，采用延性抗震设计方法，并引入能力保护设计原则。通过第一阶段的抗震设计，即对应 E1 地震作用的抗震设计，可达到和旧规范基本相当的抗震设防水平。通过第二阶段的抗震设计，即对应 E2 地震作用的抗震设计，来保证结构具有足够的延性能力，通过验算，确保结构的延性能力大于延性需求。通过引入能力保护设计原则，确保塑性铰只在选定的位置出现，并且不出现剪切破坏等破坏模式。通过抗震构造措施设计，确保结构具有足够的位移能力。而旧规范所采用的“一水准设防、一阶段设计”，只按照一个设计水平的地震参数确定地震作用

(该地震作用略比 E1 地震作用大, 小于 E2 地震作用), 采用线弹性设计方法进行抗震设计和验算<sup>[5]</sup>。

除此之外, 每本新规范的颁布, 其地震作用的计算与反应谱变化与否向来都是设计人员关注的焦点。本文将着重分析新旧规范地震作用是如何计算的以及其相应的反应谱变化情况。

新旧规范地震作用的计算公式及其反应谱分别为:

(1) 旧规范桥墩水平地震作用计算公式:

$$E_{ihp} = C_i C_z K_h \beta_1 \gamma_1 X_{1i} G_i \quad (1.1)$$

式中:  $C_i$  为重要性修正系数;  $C_z$  为综合影响系数;  $K_h$  为水平地震系数;  $\beta_1$  为动力放大系数;  $\gamma_1$  为桥墩顺桥向或横桥向的基本阵型参与系数;  $X_{1i}$  为桥墩基本振型在第  $i$  分段重心处的相对水平位移;  $G_i$  为桥墩墩身第  $i$  分段的重力(kN)。

(2) 新规范桥墩水平地震作用计算公式:

$$E_{ihp} = S_{h1} \gamma_1 X_{1i} G_i / g \quad (1.2)$$

$$E_{ihp} = \begin{cases} S_{max}(5.5T+0.45) & T < 0.1s \\ S_{max} & 0.1s \leq T \leq T_g \\ S_{max}(T_g/T) & T > T_g \end{cases} \quad (1.3)$$

$$S_{max} = 2.25 C_i C_s C_d A \quad (1.4)$$

式中:  $S_{h1}$  为相应水平方向的加速度反应谱值;  $\gamma_1$  为桥墩顺桥向或横桥向的基本阵型参与系数;  $X_{1i}$  为桥墩基本振型在第  $i$  分段重心处的相对水平位移;  $G_i$  为桥墩墩身第  $i$  分段的重力 (kN);  $T$  为结构自振周期;  $T_g$  为特征周期;  $C_i$  为重要性修正系数;  $C_s$  为场地系数;  $C_d$  为阻尼调整系数;  $A$  为水平向设计基本地震动加速度峰值。

(3) 新旧规范设计加速度反应谱:

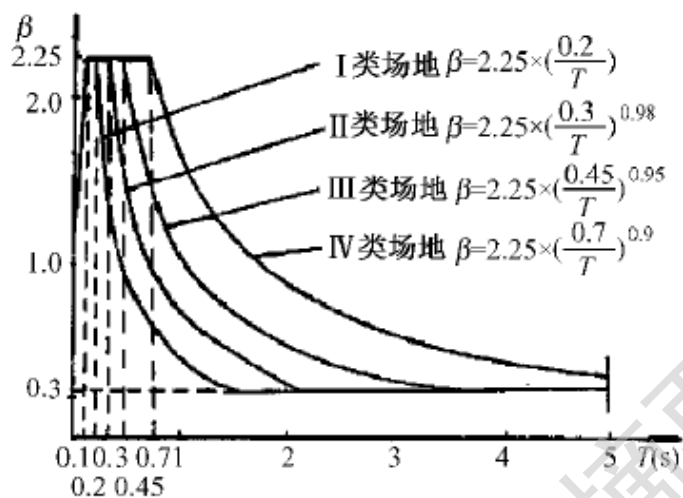


图 1.1 旧规范设计加速度反应谱

Fig. 1.1 old design acceleration response spectrum

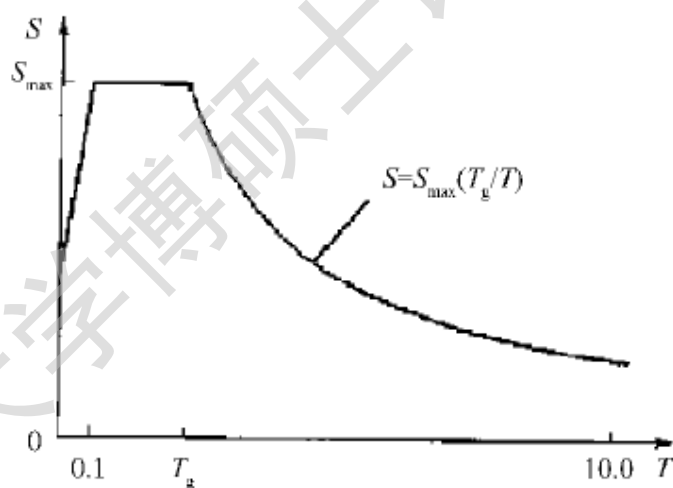


图 1.2 新规范设计加速度反应谱

Fig. 1.2 new design acceleration response spectrum

先看设计加速度反应谱的不同。

它们的不同主要有两点：其一，新规范将反应谱的自振周期从旧规范的 5s 延长到 10s，增强了对现代桥梁结构往轻质、大跨径方向发展的适应性；其二，旧规范根据 4 类场地分别列出 4 条反应谱曲线，而新规范则以 II 类场地为标准通过引入场地特征周期  $T_g$  和场地系数  $C_s$  将旧规范的 4 条曲线统一成一条，简单明了。



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库